

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЛИВОВ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА ТЕРРИТОРИИ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИХНЕВО»

*А.Н. Беседина, Е.А. Виноградов, Э.М. Горбунова,
Н.В. Кабыченко, И.С. Свинцов*

В представленной работе впервые в комплексе выделяются и рассматриваются основные типы приливных волн – суточные (K_1 , O_1) и полусуточная (M_2) в гидрогеологических, сейсмических и барометрических рядах, полученных на территории расположения геофизической обсерватории ИДГ РАН «Михнево». Сравнительный анализ гармоник приливных волн, определенных с использованием различных методов обработки данных, свидетельствует о динамике амплитуд и различии фаз задержки гидрогеологического отклика относительно проявления приливов в сейсмических данных для каждого типа волн.

Общие сведения

Геофизическая обсерватория ИДГ РАН «Михнево» (ГФО «Михнево») расположена в платформенных условиях, в центральной части Русской плиты и характеризуется устойчивым откликом на лунно-солнечные приливы. С февраля 2008 г. в пределах территории исследований организован прецизионный мониторинг уровня подземных вод синхронно с наблюдениями за микросейсмическим фоном территории исследований и атмосферным давлением.

Климат района умеренно континентальный, среднегодовое количество атмосферных осадков изменяется от 1,9 мм (2010 г.) до 2,6 мм (2008 г.). Основное количество осадков выпадает в летний (июнь–июль) и осенний (октябрь) периоды. За 2007–2010 гг. максимально высокое среднее месячное количество осадков до 5,1 мм зафиксировано в июне 2008 г., минимальное – 0,5 мм в апреле 2010 г. Наиболее значимые вариации атмосферного давления прослеживаются в весенне-осенний период и достигают 14 мм рт.ст. В летний период атмосферное давление относительно стабильно и изменяется от 746,9 до 749,7 мм рт.ст.

Опорный водоносный горизонт, вскрытый в экспериментальной скважине в интервале 92–115 м, напорный, равнинного типа с сезонными вариациями уровня, составляющими 2,1–3,8 м (рис. 1, а). Область питания подземных вод приурочена к долине реки Оки, расположенной южнее ГФО «Михнево» на расстоянии 14 км. Основной подъем воды в реке Оке регистрируется в марте–апреле в период весеннего половодья (рис. 1, б). Наиболее низкое положение уровня воды в реке до 105,1 м отмечается в летнюю межень 2010 г. (июль, август), на 0,5 м ниже среднемесячных значений за 2007–2009 гг.

Влияние граничных условий на водоносный горизонт проявляется с запаздыванием до 2 месяцев. В сентябре–ноябре 2010 г. зафиксировано уменьшение напора подземных вод до 21 м (на 1,1 м ниже по сравнению с 2009 г.) (рис. 1, а). На протяжении 2011 г. отмечены минимально низкие значения напора (до 20,3 м),

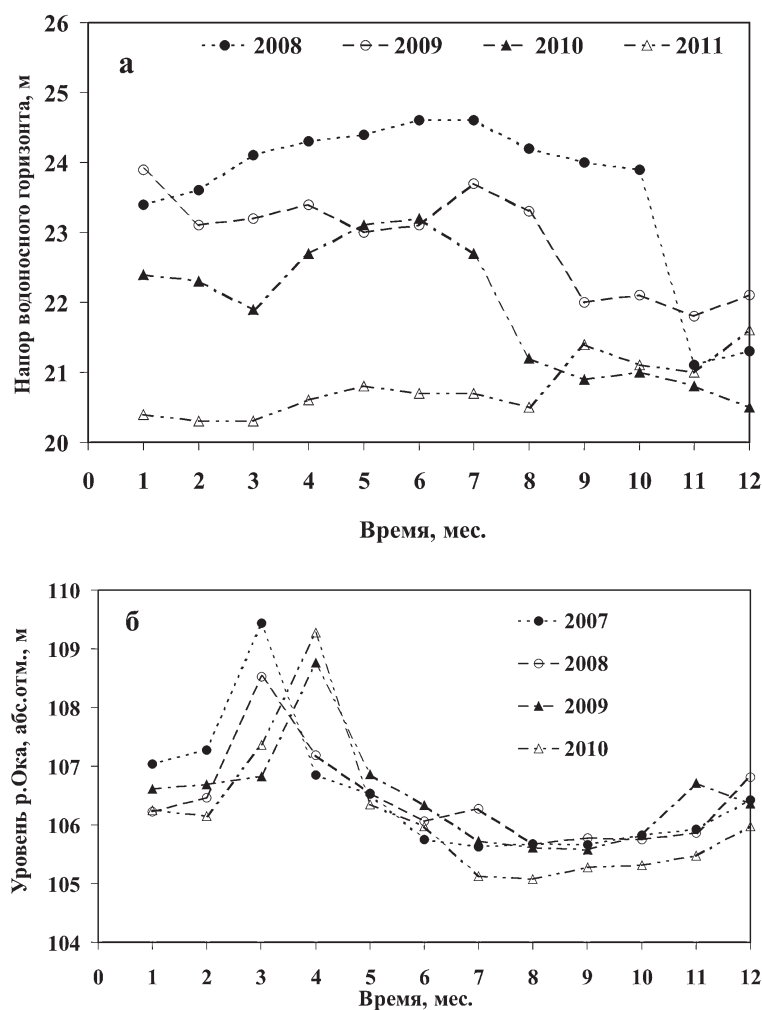


Рис. 1. Среднемесячные вариации напора водоносного горизонта (а) и уровня воды в реке Оке (б).

обусловленные предшествующим маловодным 2010 г., выраженным в низком гипсометрическом положении уровня воды в реке Оке (рис. 1, б) и минимальном среднегодовом количестве осадков.

В результате ранее выполненного анализа приливообразующей составляющей в отфильтрованных рядах гидрогеологических данных были выделены основные типы приливных волн и определено значение приливной чувствительности уровня воды, составившее $0,56 \text{ мм}/10^{-9}$ по отношению к теоретической объемной деформации [Кочарян и др., 2008]. Выполнена оценка фазового сдвига между приливными волнами в изменениях уровня воды и теоретически рассчитанными компонентами приливного гравитационного потенциала. Установлено закономерное уменьшение значений фазового сдвига в паводковый период, отличающийся выраженной тенденцией подъема пьезометрической поверхности. Показано, что фазовый сдвиг между приливной деформацией водовмещающих пород и уровнем зависит

от свойств коллектора и напора водоносного горизонта [Виноградов и др., 2010; Горбунова и др., 2009].

Методика исследований

Предварительный анализ данных прецизионных наблюдений за уровнем подземных вод выполнялся с использованием стандартного пакета MatLab 6. На первом этапе обработки проводилось выделение длиннопериодной составляющей, зависящей от условий питания водоносного горизонта. На следующем этапе оценивался коэффициент барометрической эффективности, который в дальнейшем использовался для очистки сигналов от влияния атмосферного давления. На основе спектрального анализа приливообразующей составляющей были определены сезонные вариации амплитуд суточных и полусуточных гармоник волн, сопоставленные с общим изменением уровня подземных вод. Расширение диапазона регистрации датчиков STS-2 и КСЭШ-Р [Кабыченко и др., 2011] позволило выделить приливообразующую составляющую из вертикальной компоненты смещения грунта.

Для анализа приливов в гидрогеологических, сейсмических и барометрических данных была использована однотипная методика обработки выбранных рядов синхронной регистрации. Необходимо отметить, что извлечение барометрической составляющей из вариаций уровня подземных вод может в отдельных случаях выступать в качестве помехи, искажающей исходные данные в рассматриваемом диапазоне частот. Поэтому были проанализированы два варианта рядов гидрогеологических измерений, отфильтрованные от влияния атмосферного давления и нефильтрованные. Обрабатывались ряды данных с исходной частотой регистрации 1 Гц, а также децимированные в 3600 раз. В последнем случае погрешность определения амплитуд и фаз приливных волн возрастает значительно. Для амплитуды уровня подземных вод систематическая ошибка составила 0,2–2,3 мм, для амплитуды смещения грунта – 11–50 мм, для разницы фаз – 3–7 град. По этой причине исходные ряды данных с частотой опроса 1 Гц были выбраны в качестве основных.

Для выделения фаз и расчета амплитуд приливных волн из уровня подземных вод, сейсмических записей и атмосферного давления применялись 4 метода обработки исходных данных. В первом методе амплитуда и фаза приливной составляющей определялись путем проекции исследуемой записи на косинусоиду нулевой фазы. При втором способе использовалась методика представления приливной волны как гармонической функции (косинуса). Смещение в сейсмической записи по методам 1 и 2 рассчитывалось с учетом поправки $-\frac{\pi}{2}$ к фазовому углу волны скорости, записанной сейсмометром STS-2. В 3 и 4 методах обработки проводилась предварительная полосовая фильтрация исходного ряда данных в полосе 8–26 ч для выделения пакета приливных волн. Смещение по STS-2 определялось интегрированием значений скорости вертикального движения грунта. Фазы приливных волн в смещении грунта и вариациях уровня подземных вод по методам 3 и 4 рассчитывались аналогично методам 1 и 2 соответственно.

Подобный подход к выделению приливов и сопоставление полученных результатов позволили оценить разность фаз между откликами на прилив в сейсмических и гидрогеологических данных для разных типов волн и амплитуды регистрируемых сигналов в смещении грунта, изменениях уровня подземных вод и атмосферного давления.

Результаты обработки

Для выделения приливов в вариациях уровня подземных вод исходные данные прецизионного мониторинга за период наблюдений с 2008 по 2011 гг. были отфильтрованы от длиннопериодной составляющей и атмосферного давления. Полученный ряд значений использовался для построения ежемесячных спектров, с которых были сняты значения амплитуд трех основных типов приливных волн K_1 , O_1 и M_2 . Результаты обработки 4-х летнего цикла наблюдений представлены на рис. 2.

Наиболее устойчиво и значимо прослеживается годовой цикл вариаций амплитуд для суточной волны K_1 смешанного лунно-солнечного типа, коррелирующий с изменением напора в рассматриваемой гидрогеологической системе «водоносный

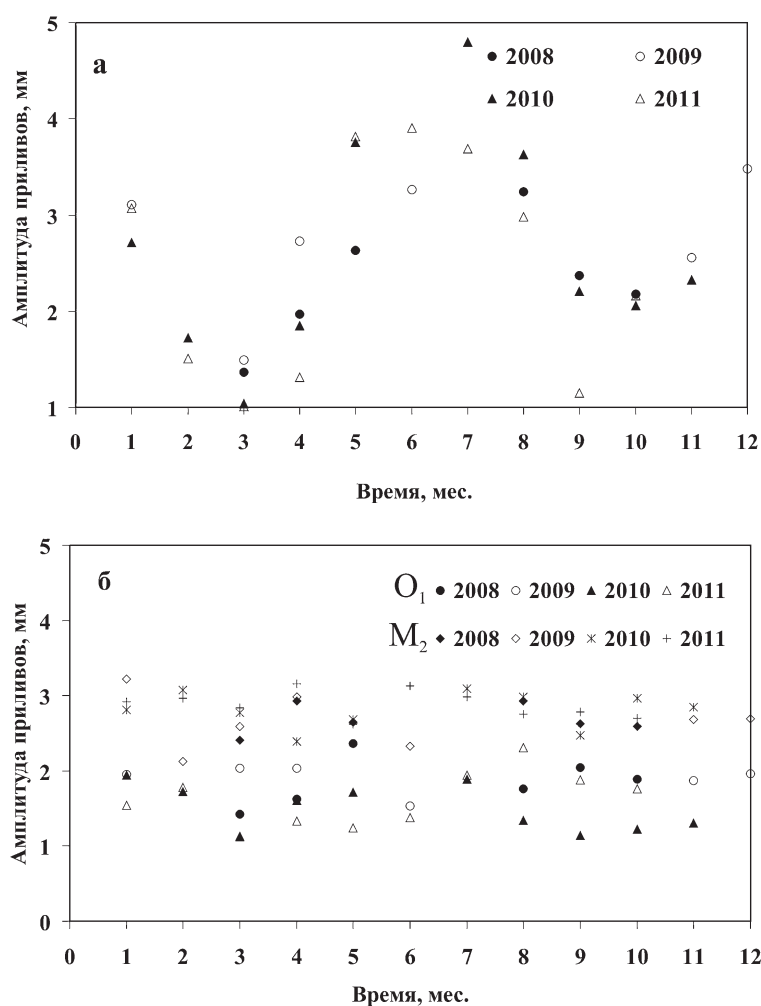


Рис. 2. Среднемесячные вариации амплитуд приливных волн, выделенных в уровне подземных вод.

а – смешанный лунно-солнечный прилив K_1 , б – главный лунный суточный O_1 и полусуточный M_2 приливы.

горизонт – скважина» (рис. 2, а). На протяжении 4-х летнего цикла наблюдений максимальные значения амплитуд приливной волны K_1 фиксируются при наиболее высоком положении уровня подземных вод. Диапазон вариаций значений амплитуд волны K_1 в течение 4-х лет относительно стабильный и достигает 2,9 мм в год. Полученный годовой цикл амплитуд приливной волны K_1 ассиметричен, наиболее значимые изменения прослежены в весенне-летний период в отличие от осенне-зимнего. Изменения амплитуд главных лунных приливных волн сопоставимы и не превышают 1,1 мм, но по абсолютным значениям интенсивность проявления полусуточной приливной волны M_2 в вариациях уровня подземных вод в 2 раза больше по сравнению с суточной O_1 (рис. 2, б).

Основным критерием для выбора периода наблюдений, используемого для сравнения гидрогеологических и сейсмических рядов данных, являлись квазистационарные условия, характеризующиеся равномерными вариациями уровня подземных вод, свидетельствующие о стабильности режима гидрогеологической системы «водоносный горизонт – скважина». В качестве наиболее приемлемого на данном этапе исследований рассматривался период с 2 по 28 апреля 2009 г. Для обработки рядов гидрогеологических, сейсмических и барометрических данных применялись 4 метода, описанные в предыдущем разделе. Основные результаты определения разности фаз между приливами, выделенными в смещении грунта и колебаниях уровня подземных вод, с частотой опроса 1 Гц приведены в таблице 1.

Видно, что фильтрация уровня подземных вод от влияния атмосферного давления по всем методам вносит фазовый сдвиг при оценке разности фаз между приливами в смещении грунта и в изменении уровня подземных вод. Для всех типов волн установлено опережение фазового сдвига, рассчитанного с учетом влияния атмосферного давления за исключением значений, полученных для лунно-солнечной волны K_1 по методам 1 и 2.

Хорошая сходимость результатов отмечается при использовании методов 3 и 4, поэтому полученные данные могут быть приняты за основу при оценке разности фаз между приливами, выделенными в смещении грунта и изменении уровня подземных вод, нефильтрованного от влияния атмосферного давления. Для низкочастотных приливных волн прослеживается увеличение в задержке фаз между откликами на лунно-солнечные приливы в сейсмических и гидрогеологических данных. Так, при пересчете на часы сдвиг фаз для полусуточной волны M_2 составил 6 часов, для суточных K_1 и O_1 – 9 и 11,5 часов соответственно. На рис. 3 представлены выделенные из сейсмических и гидрогеологических рядов приливные суточные волны K_1 и O_1 и полусуточная волна M_2 .

Данные по анализу амплитуд приливных волн в вариациях уровня подземных вод, смещении грунта и атмосферного давления, рассчитанные по 4 методам, приведены в таблицах 2–4.

Полученные результаты показывают, что наименьшие расхождения в разности амплитуд приливных волн, определенных по исходным данным прецизионной регистрации изменений уровня подземных вод и отфильтрованным от атмосферного давления, отмечаются по методам 3 и 4 (табл. 2). Для приливных волн M_2 и K_1 разница амплитуд сопоставима с точностью проводимых измерений, составляющих 0,1 мм. Анализ вариаций суточной волны O_1 следует выполнять по данным, отфильтрованным от влияния атмосферного давления, из-за расхождения разности амплитуд. В рассматриваемый межлетний период наблюдений амплитуды приливных волн M_2 и K_1 в уровне подземных вод близки и не превышают 4,1 мм, для волны O_1 минимальны и составляют 3,7 мм.

Таблица 1

Тип вол-ны	Период, час	Разность фаз между приливами в смещении грунта и в изменении уровня подземных вод, град											
		Метод 1			Метод 2			Метод 3			Метод 4		
		Исход-ная	Для уровня, отфильтро-ванного от давления	Фазо-вый сдвиг	Исход-ная	Для уровня, отфильтро-ванного от давления	Фазо-вый сдвиг	Исход-ная	Для уровня, отфильтро-ванного от давления	Фазо-вый сдвиг	Исход-ная	Для уровня, отфильтро-ванного от давления	Фазо-вый сдвиг
K ₁	23,935	155,188	150,743	-4,4	155,052	149,940	-5,1	134,34	151,386	17,0	134,388	151,396	17,0
O ₁	25,819	167,070	175,938	8,9	167,071	177,335	10,3	160,636	179,927	19,3	160,635	179,927	19,3
M ₂	12,421	171,881	-178,718	9,4	171,970	-179,901	8,1	174,367	-177,189	8,4	174,367	-177,190	8,4

Таблица 2

Тип вол-ны	Амплитуда приливных волн, выделенных в уровне подземных вод, мм											
	Метод 1				Метод 2				Метод 3			
	Исход-ный уровень	Уровень, отфильтро-ванный от давления	Раз-ность ампли-туд	Исход-ный уровень	Уровень, отфильтро-ванный от давления	Раз-ность ампли-туд	Исход-ный уровень	Уровень, отфильтро-ванный от давления	Исход-ный уровень	Уровень, отфильтро-ванный от давления	Исход-ный уровень	Уровень, отфильтро-ванный от давления
K ₁	4,172	4,333	-0,161	4,175	4,251	-0,076	3,921	4,028	3,926	4,031	3,926	4,031
O ₁	8,247	4,001	4,246	8,247	3,888	4,359	6,450	3,730	6,450	3,730	6,450	3,730
M ₂	4,129	4,236	-0,107	4,128	4,290	-0,162	4,182	4,146	4,182	4,147	4,182	4,147

Таблица 3

Тип вол-ны	Амплитуда приливных волн, выделенных в смещении грунта, мм											
	Метод 1				Метод 2				Метод 3			
	По данным STS-2	По ETER-NE	Разность ампли-туд	По данным STS-2	По ETER-NE	Разность ампли-туд	По данным STS-2	По ETER-NE	По данным STS-2	По ETER-NE	Разность ампли-туд	Wilhelm et al., 1997
K ₁	155,814	83,799	72,015	155,899	83,736	72,163	147,065	79,590	67,475	146,997	67,389	141
O ₁	123,461	71,891	51,57	123,462	71,890	51,572	107,321	64,934	42,387	107,320	64,933	100
M ₂	99,908	57,258	42,65	99,901	57,258	42,643	100,004	57,606	42,398	100,012	57,608	108

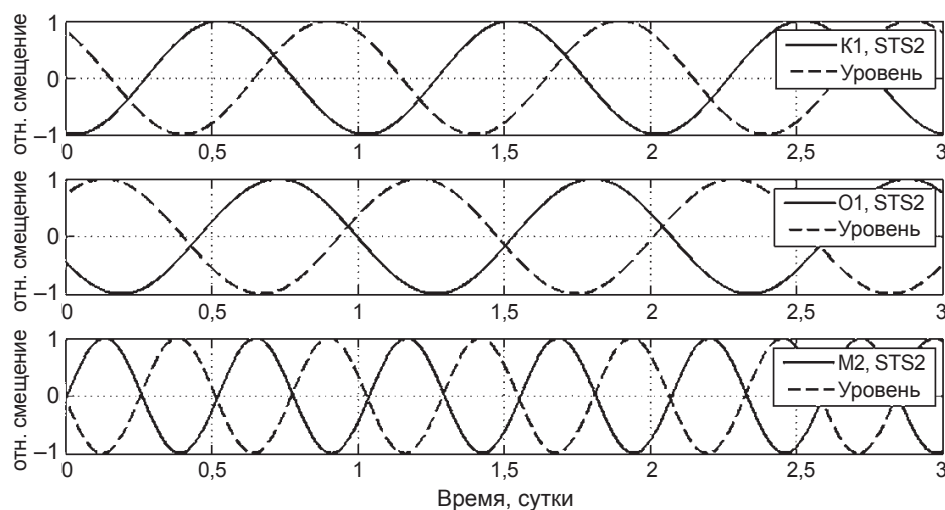


Рис. 3. Приливные волны M_2 , K_1 и O_1 , выделенные из сейсмических и гидрогеологических данных (сплошная и прерывистая линии соответственно).

Амплитуды приливных волн, прослеженных в смещениях грунта по данным регистрации сейсмоприемника STS-2, расположенного в шахте на глубине 20 м на территории ГФО «Михнево», изменяются в широких пределах (табл. 3). В соответствии с расчетами по методам 3 и 4 для лунно-солнечного суточного прилива K_1 достигают 147 мм, по лунному полусуточному приливу M_2 не превышает 100 мм.

Амплитуды основных приливных волн суточных K_1 , O_1 и полусуточной M_2 , выделенных в смещении грунта на территории ГФО «Михнево», определены также с использованием программного пакета ETERNA 3.0 [Wenzel, 1994] с учетом координат расположения пункта регистрации $54,959^\circ$ с.ш., $37,766^\circ$ в.д. (табл. 3). Расхождение между теоретически и экспериментально полученными значениями амплитуд смещения для всех типов волн значительны, но не противоречат опубликованным данным оценок амплитуд приливных волн, определенных для широты 50° [Wilhelm et al., 1997] (табл. 3). Наибольший сдвиг фаз между приливными волнами, выделенными по данным регистрации STS-2 и рассчитанными по программе ETERNA 3.0, отмечен для суточной волны K_1 , для которой зафиксирована и максимальная разность амплитуд смещений грунта, достигающая 72,163 мм.

В атмосферном давлении также выделены основные типы приливных волн (табл. 4), прослеженные в гидрогеологических и сейсмических рядах данных. Приливная суточная волна O_1 , определенная из записи атмосферного давления, имеет наибольшую амплитуду и в 5–7 раз превышает значения волн K_1 и M_2 . На рис. 4 показаны группы приливных волн в полосе от 8 до 26 часов в смещении грунта, изменениях уровня подземных вод в скважине и атмосферного давления за лунный цикл. Максимальные амплитуды суточных и полусуточных гармоник волн в вариациях уровня приурочены, как правило, к минимальным значениям лунно-солнечного притяжения. Напротив, в эти же периоды в сейсмических данных отмечается уменьшение амплитуд смещения грунта под влиянием приливных сил. В пакете приливных волн, выделенных из барометрического ряда данных, лунно-солнечные вариации слабо выражены.

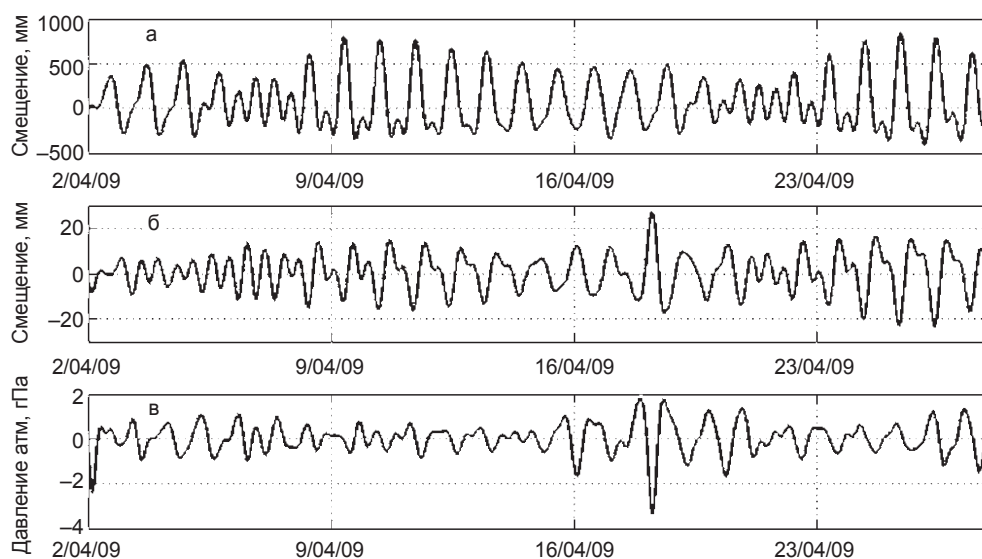


Рис. 4. Приливные волны в полосе 8–26 ч за период 02–28.04.2009, выделенные из сейсмических (а), гидрогеологических (б), барометрических (в) данных (1 гПа = 0,75 мм рт.ст.). Фазы Луны: 2.04.09 – 2-я четверть, 9.04.09 – полнолуние, 17.04.09 – 4-я четверть, 25.04.09 – новолуние.

Таблица 4

Тип волн	Период, час	Амплитуда приливных волн, выделенных в атмосферном давлении, гПа			
		Метод 1	Метод 2	Метод 3	Метод 4
K_1	23,935	0,076	0,076	0,099	0,099
O_1	25,819	0,399	0,399	0,407	0,407
M_2	12,421	0,056	0,056	0,045	0,045

Заключение

Для территории ГФО «Михнево» в рядах прецизионных наблюдений за уровнем водоносного горизонта с 2008 по 2011 гг. прослежен ряд признаков, указывающих на изменчивость гидрогеологического отклика на лунно-солнечные приливы в течение четырех годовых циклов. По результатам спектрального анализа приливообразующей составляющей максимальные среднемесячные значения амплитуд до 3,9 мм отмечены для суточного смешанного лунно-солнечного K_1 прилива. Интенсивность выраженности полусуточного главного лунного прилива M_2 выше суточного главного лунного прилива O_1 . Динамика изменения суточных и полусуточной волн в вариациях уровня подземных вод на протяжении годовых циклов различается.

Для относительно спокойного межennale периода (апрель 2009 г.), соответствующего полному лунному циклу, в сейсмических, гидрогеологических и барометри-

ческих рядах для выделенных гармоник приливных волн (K_1 , O_1 и M_2) рассчитаны фазы и амплитуды. Сдвиг фаз между приливами в смещении грунта и в изменении уровня подземных вод для полусуточной волны M_2 составил 6 часов, для суточных K_1 и O_1 – 9 и 11,5 часов соответственно.

Максимальные значения амплитуд смещения грунта (до 155,9 мм), изменений уровня подземных вод (до 4,3 мм) и атмосферного давления (до 0,4 гПа) обусловлены суточным лунно-солнечным приливом K_1 . Интенсивность отклика на суточный лунный прилив O_1 в смещении грунта и изменении атмосферного давления в 1,1–2,0 раза выше по сравнению с откликом на полусуточный лунный прилив M_2 . Напротив, в колебании уровня подземных вод амплитуда полусуточного лунного прилива M_2 выражена в 1,1 раза больше по отношению к отклику на суточную лунную волну O_1 .

Группы приливных волн, выделенные в полосе от 8 до 26 часов, в вариациях уровня подземных вод изменяются в противофазе относительно смещению грунта и атмосферного давления. Вариации амплитуд приливных волн, прослеженные в смещении грунта и в уровне подземных вод, задержка фаз между гидрогеологическими и сейсмическими данными могут быть связаны с изменением условий массопереноса флюидов, обусловленных изменением порового давления и структуры фильтрационных связей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 10-05-00917-а, 12-05-00956-а) и ОНЗ РАН (программа № 8).

Литература

Виноградов Е.А., Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Гидрогеологический отклик на изменение эффективного напряжения водонасыщенных пород // Динамические процессы в геосферах: сб. научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2010. С. 88–96.

Горбунова Э.М., Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Исследование динамики вариаций уровня подземных вод под воздействием внешних факторов // Проблемы взаимодействующих геосфер: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2009. С. 232–244.

Кабыченко Н.В., Кочарян Г.Г., Павлов Д.В., Беседина А.Н. Об оценке смещения и деформации в приливных волнах по цифровым записям сейсмометров STS-2 и КСЭШ-Р // Сейсмические приборы. Т. 47. № 3. 2011.

Кочарян Г.Г., Горбунова Э.М., Копылова Г.Н., Павлов Д.В., Свинцов И.С. Предварительные результаты прецизионных наблюдений за режимом подземных вод на территории геофизической обсерватории «Михнево» // Локальные и глобальные проявления воздействий на геосферы: сборник научных трудов ИДГ РАН. М.: ГЕОС. 2008. С. 52–62.

Wenzel H.G. Earth tide analysis package ETERNA 3.0 / BIM. 1994. № 118. P. 8719–8721.

Wilhelm H., Zurn W., Wenzel H.-G. Tidal Phenomena. Lecture Notes in Earth Sciences. V. 66. Berlin: Springer. 1997. P. 61.